

Efeitos da eletrocoagulação na modificação das características de lodos ativados: aplicação em biorreatores a membrana

Effects of electrocoagulation on activated sludge characteristics modification: application in membrane bioreactors

- **Data de entrada:**
11/05/2017
- **Data de aprovação:**
04/06/2018

André Aguiar Battistelli* | Tiago José Belli | Rayra Emanuely da Costa | Naiara Mottim Justino | Maria Ângeles Lobo-Recio | Flávio Rubens Lapolli

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.048>

Resumo

O presente trabalho buscou avaliar a aplicação do processo de eletrocoagulação na remoção de fósforo e no aumento da filtrabilidade do licor misto de reatores aeróbios com vistas à aplicação em biorreatores a membrana (BRM). Um planejamento fatorial 2^2 foi elaborado para a realização dos experimentos, nos quais foram avaliadas a aplicação de diferentes densidades de corrente (4,0, 7,0 e 10,0 A.m⁻²) e modos de exposição em minutos (6 ligado/6 desligado; 6 ligado/12 desligado; 6 ligado/18 desligado). Adicionalmente, foram realizados ensaios de respirometria a fim de avaliar os possíveis efeitos à atividade da biomassa. Foi verificado um aumento da filtrabilidade do licor misto e da remoção de P-PO₄⁻³ e produtos microbianos solúveis (PMS) na maioria das condições testadas. Não foram observados efeitos expressivos à atividade da biomassa sob a condição otimizada. **Palavras-chave:** Eletrocoagulação. Remoção de Fósforo. Produtos microbianos solúveis. Biorreator a membrana. Lodos ativados.

Abstract

*The present study aimed to evaluate the electrocoagulation process application to phosphorus removal and to increase the filterability of the aerobic reactors mixed liquor for the application in membrane bioreactors (MBR). A factorial design 2^2 was developed for the experiments, where the application of different current densities (4.0, 7.0 and 10.0 A.m⁻²) and exposure modes in minutes (6 ON / 6 OFF; 6 ON / 12 OFF, 6 ON / 18 OFF). In addition, respirometric tests were performed to evaluate the possible effects on the biomass activity. There was an increase in the mixed liquor filterability and the removal of P-PO₄⁻³ and soluble microbial products (SMP) under most conditions tested. No significant effects were observed on the biomass activity under optimized conditions. **Keywords:** Electrocoagulation. Phosphorus Removal. Soluble microbial products. Membrane bioreactor. Activated Sludge.*

André Aguiar Battistelli – Graduado em Engenharia Ambiental. Doutor em Engenharia Ambiental. Professor do Departamento de Meio Ambiente da Universidade Estadual de Maringá - PR.

Tiago José Belli – Graduado em Engenharia Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental. Doutor em Engenharia Ambiental. Professor Adjunto do departamento de Engenharia Sanitária da Universidade do Estado de Santa Catarina.

Rayra Emanuely da Costa – Graduada em Engenharia Ambiental. Mestre em Engenharia Urbana. Doutora em Engenharia Ambiental.

Naiara Mottim Justino – Graduada em Engenharia Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental. Doutoranda em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina.

Maria Ângeles Lobo-Recio – Doutora em Química. Professora Adjunta do departamento de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina.

Flávio Rubens Lapolli – Doutor em Hidráulica e Saneamento. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

***Endereço para correspondência:** Campus Universitário UFSC - Trindade - Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) - 3º andar - Florianópolis - SC. CEP: 88040-490. Telefone: (48) 3721-7750. E-mail: andreambiental@live.com.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A tecnologia de biorreatores a membrana pode ser entendida como a combinação do processo de lodos ativados convencionais, com o processo físico de separação por membranas (JUDD e JUDD, 2011). Dentre as principais vantagens dos BRM em relação aos processos convencionais de tratamento, além da alta qualidade do efluente produzido, podem ser destacadas a menor produção de lodo e o menor espaço requerido para realizar o tratamento (METCALF e EDDY, 2003; KOOTENAEI e AMINIRAD, 2014). Devido a essas vantagens, os BRM são considerados atualmente uma tecnologia promissora para o tratamento de efluentes sanitários (DOHARE e TRIVEDI, 2014).

Entretanto, um dos principais obstáculos para difundir globalmente a utilização dos BRM é a colmatação das membranas (DREWS, 2010; LIN et al., 2014). A colmatação pode ser entendida como a acumulação de substâncias sobre a superfície e/ou dentro dos poros da membrana, o que pode provocar a redução de sua produtividade e o aumento da frequência de limpezas físicas e químicas (MANNINA e COSENZA, 2013). Nesse contexto, os produtos microbianos solúveis (PMS) desempenham um papel importante, uma vez que possuem relação direta com a colmatação devido a sua capacidade de formação de agregados microbianos na forma de biofilme sobre a superfície da membrana (WANG et al., 2012).

Dentre as alternativas utilizadas para a redução da colmatação das membranas, a modificação das características do licor misto, de modo a aumentar sua filtrabilidade, tem sido bastante empregada (MISHIMA e NAKAJIMA, 2009; JI et al., 2010; WANG et al., 2014). Nesse viés, o processo eletrocoagulação vem ganhando destaque nos últimos anos frente aos processos de coagulação tradicionais, principalmente em função da simplicidade operacional dos sistemas, da menor produção de lodo e da elevada capacidade de

aglomeração de poluentes sem a necessidade de inserção de produtos químicos (MOLLAH, 2004; SAHU et al., 2014).

Nos casos em que ânodos de alumínio são empregados nesse processo, ocorre a liberação de Al^{+3} para o meio, o que caracteriza a geração do agente coagulante *in situ* (MORENO-CASILLAS et al., 2007). Tal agente possui, ainda, a capacidade de promover a precipitação e posterior remoção do fósforo, que dificilmente é suprimido nos processos convencionais de tratamento e é conhecidamente o elemento limitante no fenômeno de eutrofização (SHALABY et al., 2014).

A associação da eletrocoagulação à tecnologia de BRM é vista, ainda, como uma alternativa bastante recente no setor de saneamento. Dessa forma, poucos são os trabalhos que avaliaram o desempenho dessa nova tecnologia na remoção de fósforo e na minimização da colmatação das membranas, especialmente com vistas à otimização do processo (AKAMATSU et al., 2010; HASSAN et al., 2012; IBEID, ELEKTOROWICZ e OLESZKIEWICZ, 2013a; TAFTI et al., 2015; ZHANG et al., 2015), o que remete à necessidade de novos estudos nessa temática.

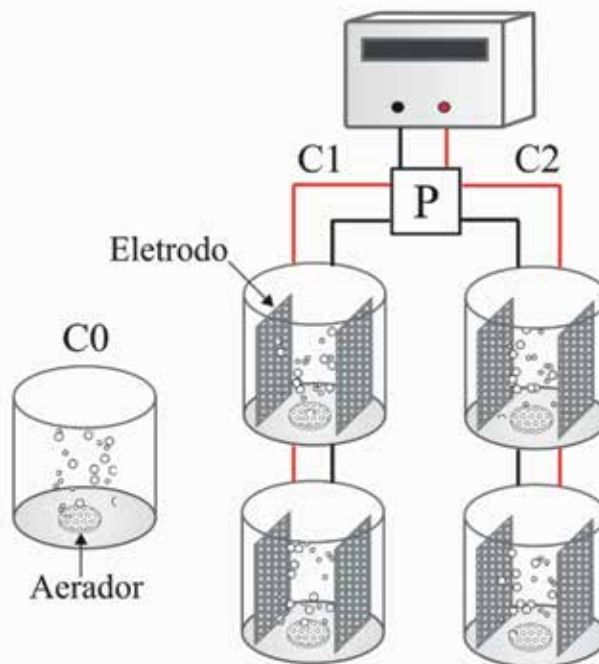
Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi otimizar as condições operacionais para a aplicação do processo de eletrocoagulação na remoção de fósforo e melhoria da filtrabilidade do licor misto, além de avaliar os possíveis efeitos adversos do processo à atividade da biomassa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada no trabalho, composta por cinco eletrobiorreatores em escala de bancada, é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática da unidade experimental em escala de bancada



C0: eletrobiorreator controle; C1: circuito 1, C2: circuito 2; P: painel de comandos elétricos

Cada eletrobiorreator possuía 1,0 L de volume total e era equipado com eletrodos com dimensões de 5,5 x 14,0 cm, espaçados entre si por 5,0 cm. O ânodo foi construído em placas planas de alumínio com perfuração de 46% da superfície; já o cátodo consistiu em uma tela fina de aço inoxidável. O provimento de oxigênio aos micro-organismos, bem como a manutenção do regime de mistura completa nos reatores, foi realizado por meio de difusores de ar instalados em sua base.

A densidade de corrente aplicada foi controlada por meio de uma fonte de alimentação digital ajustável de corrente contínua (PS A305D), com variação de tensão de 0-30 V e de corrente de 0-5 A. O modo de exposição foi regulado por temporizadores digitais acoplados a um painel de comandos elétricos instalado entre a fonte de alimentação e os eletrodos. O sistema era composto por dois circuitos independentes (C1 e C2), com dois eletrobiorreatores ligados em cada, o que permitiu a operação simultânea de duas

condições operacionais distintas. O quinto biorreator (C0) possuía as mesmas configurações dos demais, porém não era ligado ao sistema elétrico, de modo a permitir a operação sem aplicação de corrente para fins de comparação.

2.2 Procedimento Experimental

O licor misto utilizado nos ensaios foi coletado junto ao tanque de aeração da estação de tratamento de esgotos (ETE) Insular da cidade de Florianópolis – SC, do tipo lodos ativados de aeração prolongada, pertencente à Companhia Catarinense de Águas e Esgotos (CASAN). Após a coleta, o licor misto em questão foi submetido à sedimentação e retirada do sobrenadante visando padronizar a concentração de sólidos para um valor próximo das condições consideradas normais para operação de BRM. A concentração de PO_4^{-3} inicial foi ajustada em $7,0 \text{ mg.L}^{-1}$, por meio da adição de fosfato de potássio monobásico

(KH₂PO₄, PA, 99%, Aldrich). Tais procedimentos de padronização foram realizados para cada nova coleta de licor misto a serem utilizados durante uma nova sequência de ensaios.

Uma vez padronizado, o licor misto era acondicionado nos reatores (800 mL) e submetido aos ensaios de eletrocoagulação, nos quais se buscava melhorar as condições de filtrabilidade do licor misto e também promover a remoção de fósforo. Para o primeiro caso, foram considerados dois parâmetros importantes nesse processo: concentração de produtos microbianos solúveis e índice de incrustação do licor misto (MFI, do inglês: *mixed liquor fouling index*) (DREWS, 2010). Dessa forma, o desempenho da eletrocoagulação foi avaliado quanto à remoção de PMS, variação do MFI e remoção de fósforo.

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios de sólidos suspensos totais (SST), MFI, PMS e fósforo das amostras de licor misto padronizadas.

Tabela 1 – Valores médios de SST, MFI, PMS e fósforo das amostras de licor misto padronizadas.

SST (mg.L ⁻¹)	MFI (s.mL ⁻¹)	PMS (mg.L ⁻¹)	Fósforo (mg.L ⁻¹)
4770 ± 355	0,25 ± 0,12	13,5 ± 2,20	7,07 ± 0,05

SST: sólidos suspensos totais; MFI: membrane fouling index; PMS: produtos microbianos solúveis.

A fim de avaliar o efeito das variáveis (densidade de corrente e modo de exposição) simultaneamente, bem como a correlação entre tais variáveis, foi realizado um planejamento fatorial 2² com ponto central em triplicata. A organização de um planejamento fatorial consiste em selecionar as variáveis e determinar os níveis (valores assumidos pelas variáveis) durante os experimentos. A utilização do planejamento fatorial é interessante neste caso, pois permite determinar a condição operacional otimizada do processo com um número mínimo de experimentos.

Os valores dos níveis para as variáveis foram adotados com base no estudo prévio de Ibeid, Elektrowicz e Oleszkiewicz (2013a). Assim, os experimentos foram realizados mediante três densidades de corrente (4,0, 7,0 e 10,0 A.m⁻²) e três modos de exposição diferentes, em minutos (6 ligado/6 desligado; 6 ligado/12 desligado e 6 ligado/18 desligado). Cada condição foi avaliada em duplicata durante 70 h. Um biorreator sem aplicação de corrente elétrica foi operado simultaneamente para fins de comparação (IBEID, ELEKTROWICZ e OLESZKIEWICZ, 2013a). Na Tabela 2 é apresentado o planejamento fatorial, bem como a distribuição dos ensaios com as respectivas condições utilizadas para cada densidade de corrente. No presente estudo, adotou-se a simbologia de níveis máximos (+) e níveis mínimos (-), além do ponto central (0).

Tabela 2 – Planejamento fatorial 2² elaborado para a determinação das melhores condições operacionais elétricas do sistema

Variáveis	Nível (-)	Nível (0)	Nível (+)
A. Densidade de corrente (A.m ⁻²)	4,0	7,0	10,0
B. Modo de exposição (Min)	6 ligado / 18 desligado	6 ligado / 12 desligado	6 ligado / 6 desligado
Experimento	Variáveis		
	A	B	A x B
1	-	-	+
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	+
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0

A x B: Efeito combinado entre as duas variáveis

Para a interpretação dos resultados obtidos em todos os reatores simultaneamente, foi utilizado o conceito de função de desejabilidade (DERRINGER e SUICH, 1980). Nesse procedimento é encontrado um valor di (desejabilidade) para cada resposta, o qual é calculado padronizando-se todas as respostas de determinado parâmetro para valores entre 0 e 1. Em seguida, é realizado o cálculo da média geométrica dos valores de di obtidos para cada condição operacional, que resulta na desejabilidade combinada (D). Os valores de D representam a eficiência global de cada condição operacional, e, portanto, permitem a otimização por meio de técnicas de análise multivariada.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de eletrocoagulação, foi selecionada a condição operacional que apresentou os melhores resultados no que diz respeito a remoção de PMS, melhora do MFI e remoção de fósforo. Posteriormente, a estratégia escolhida foi replicada, submetendo a biomassa, ao final desse ensaio de eletrocoagulação, a testes de respirometria, segundo o procedimento descrito no item *Métodos Analíticos* com o objetivo de se verificar se a corrente elétrica impactaria negativamente a atividade microbiológica bacteriana.

2.3 Métodos Analíticos

A concentração de ortofosfato solúvel (P-PO₄-3) foi quantificada de acordo com o método do ácido molibdo vanadofósforico (APHA, 2005). Para realização do procedimento, as amostras foram previamente filtradas em membrana de acetato celulose com tamanho de poro de 0,45 μm .

Os produtos microbianos solúveis (PMS) foram quantificados sob a forma de proteínas e polissacarídeos. As proteínas foram quantificadas de acordo com o método descrito por Lowry et al. (1951); já para determinação dos polissacarídeos foi aplicado o método descrito por Dubois et al.

(1956). A leitura da absorvância foi realizada em espectrofotômetro HACH, modelo DR3900, sob os comprimentos de onda de 760 e 490 nm, para proteínas e polissacarídeos, respectivamente.

O Índice de Incrustação do Licor Misto (MFI - *Modified Fouling Index*), utilizado nos processos de filtração por membranas para representar o potencial de incrustação que determinado fluido possui, foi realizado de acordo com a metodologia descrita por Schippers e Verdouw (1980).

As atividades autotrófica e heterotrófica da biomassa foram monitoradas por meio de testes respirométricos (IVERSEN et al., 2009). Para esse fim, 1,0 L de licor misto foi coletado dos eletrobiorreatores e mantido sob aeração constante por 24h. Posteriormente, a aeração foi desligada, o licor misto foi mantido sob agitação de 130 rpm e a taxa de consumo de oxigênio endógena ($\text{TCO}_{\text{endógena}}$) foi mensurada. Em seguida, substratos específicos foram adicionados para avaliar a taxa de consumo de oxigênio das bactérias nitrificantes (TCO_{NH_4}) (NH_4Cl , PA, 99,5%, Biotec) e a taxa de consumo de oxigênio das bactérias heterotróficas ($\text{TCO}_{\text{heterotrófica}}$) (CH_3COONa , PA, 99,5%, Neon). Os dados referentes à concentração de oxigênio dissolvido (OD) eram coletados a cada 5 segundos utilizando uma sonda YSI ProODO. O cálculo da TCO era realizado a partir do decaimento da concentração de OD na ordem de 1,0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

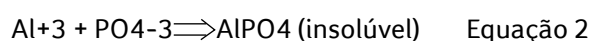
3.1 Avaliação da remoção de fósforo e da melhoria das condições de filtrabilidade do licor misto

Na Tabela 3 são apresentados os resultados referentes à porcentagem de remoção de fósforo e PMS, e a porcentagem de melhoria do MFI do licor misto para cada ensaio do planejamento fatorial proposto.

Tabela 3 - Remoção de fósforo e PMS, e a porcentagem de melhoria do MFI do licor misto para cada ensaio do planejamento fatorial proposto

Ensaio	Modo de Exposição (Min)	Densidade de corrente (A.m ⁻²)	% Aumento MFI	% Remoção	
				PMS	Fósforo
1	6 lig / 18 des	4,0	6,43	-69,39	89,91
2	6 lig / 18 des	10,0	54,72	17,73	98,90
3	6 lig / 6 des	4,0	62,00	-12,47	98,06
4	6 lig / 6 des	10,0	85,16	32,89	99,95
5	6 lig / 12 des	7,0	54,94	34,54	99,76
6	6 lig / 12 des	7,0	52,08	39,15	98,89
7	6 lig / 12 des	7,0	52,68	30,57	98,73

É possível verificar que a remoção de fósforo foi elevada em todas as condições testadas. Tal comportamento já era esperado, uma vez que o alumínio dissociado durante o processo de eletrocoagulação pode reagir com o fosfato solúvel presente no meio e formar complexos insolúveis, conforme descrito na Equação 2 (MOLLAH, 2004).



Lacasa (2011) também observou que pequenas variações na densidade de corrente não resultam em grandes melhorias na capacidade de remoção de fósforo, uma vez que a dosagem de alumínio para o meio líquido não é substancialmente alterada. Kim et al. (2010), ao utilizar uma unidade de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio, seguida de um biorreator a membrana para o tratamento de efluentes domésticos, também obtiveram remoção de fósforo próxima a 90%. De acordo com esses autores, os compostos formados possuem ampla área superficial, e, portanto, podem ser facilmente removidos por processos de separação de fases, tal como a filtração em membranas.

Os PMS por sua vez, são produtos excretados pela biomassa e considerados um dos principais compostos relacionados à colmatção das membranas (LIN et al., 2014). No presente estudo, é possível verificar que a remoção de PMS observada foi satisfatória e semelhante nos ensaios com densidades de corrente de 7,0 e 10,0 A.m⁻² (Tabela 3).

Já nos ensaios em que a corrente de 4,0 A.m⁻² foi empregada, observou-se eficiência negativa, ou seja, ocorreu o aumento da concentração após a aplicação da corrente elétrica. Tal fato pode estar relacionado à incapacidade do sistema de remover o PMS adicional produzido ao longo do ensaio, em função da baixa densidade de corrente aplicada. Borea, Naddeo e Belgiorno (2016) avaliaram a aplicação de gradientes de voltagem de 1 V/cm e 3 V/cm em um BRM e também observaram um aumento na concentração de PMS, mensurado sob a forma de polissacarídeos, no reator submetido à menor voltagem testada. De acordo com estes autores, a baixa carga negativa dos polissacarídeos, e a consequente menor interação com os compostos de alumínio positivamente carregados, pode estar relacionada à menor capacidade de remoção observada.

De acordo com Jarusutthirak e Amy (2006), quanto maior a concentração de PMS, menor a capacidade de filtração. Tal constatação também foi observada por Wang et al. (2012) que, operando dois BRM em paralelo com concentrações de PMS variáveis, observaram que a filtrabilidade do licor misto era prejudicada onde a concentração de PMS era maior.

No presente estudo, é possível verificar que a filtrabilidade do licor misto foi substancialmente melhorada na maioria dos ensaios (Tabela 3). O aumento mais significativo foi observado no ensaio 4, onde a condição operacional empregada foi com maior densidade de corrente e

menor intervalo de tempo desligado. Cabe destacar que, sob tal condição, a concentração de PMS também foi bastante reduzida. Hasan et al. (2012), em estudo comparativo entre um BRM e um BRM associado com o processo de eletrocoagulação, também observaram comportamento semelhante. Esses autores apontaram a elevada concentração de PMS no licor misto do BRM convencional como um dos principais fatores responsáveis pela colmatação.

Ibeid, Elektorowicz e Oleszkiewicz (2013b), aplicando densidades de corrente entre 15 e 35 A.m⁻² e modos de exposição intermitentes, observaram uma melhoria na filtrabilidade do licor misto de até 4,8 vezes. Tais autores afirmam que a aplicação de correntes acima de 15 A.m⁻² são

mais eficientes para o aumento da filtrabilidade do licor misto, em função da maior capacidade de desaguamento dos flocos sob essa condição. Esses resultados podem explicar, em parte, o aumento menos expressivo da filtrabilidade do licor misto observado no presente estudo, uma vez que a maior densidade de corrente avaliada foi de 10 A.m⁻².

3.2 Otimização das condições operacionais

Na Tabela 4 é apresentada a desejabilidade combinada (D) para cada condição testada, de acordo com o planejamento fatorial 2² previamente realizado. A desejabilidade foi calculada com base nos resultados apresentados na Tabela 3.

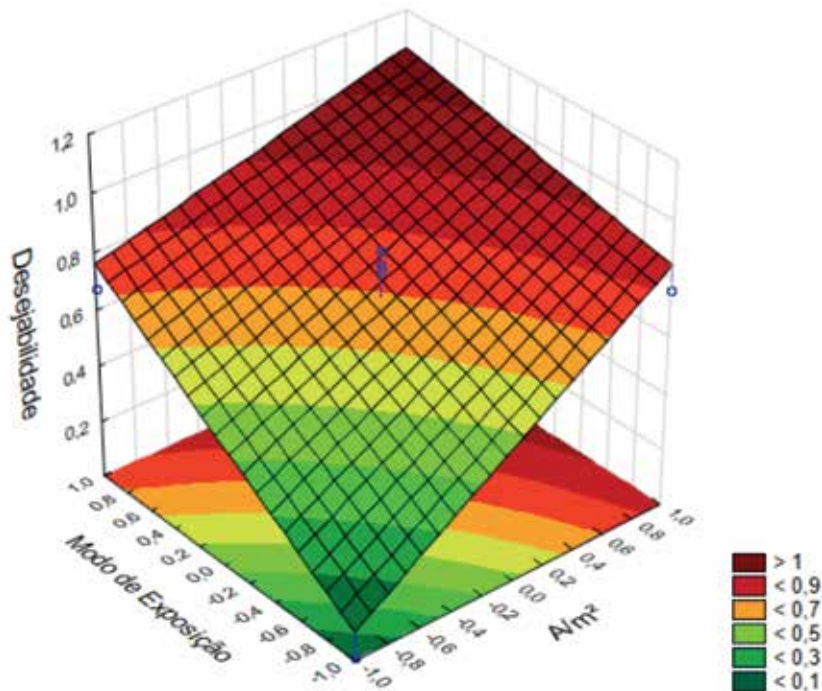
Tabela 4 - Planejamento fatorial 2² elaborado para realização dos ensaios, apresentando como resposta a desejabilidade combinada

Variável	Nível			
	-	0	+	
A. Densidade de Corrente (A.m ⁻²)	4,0	7,0	10,0	
B. Modo de Exposição (Minutos)	6 ligado / 18 desligado	6 ligado / 12 desligado	6 ligado / 6 desligado	
Experimento	Variáveis			Desejabilidade
	A	B	A x B	
1	-	-	+	0,01
2	+	-	-	0,76
3	-	+	-	0,67
4	+	+	+	0,98
5	0	0	0	0,85
6	0	0	0	0,80
7	0	0	0	0,78

É possível verificar que a maior desejabilidade foi obtida no Ensaio 4, no qual as duas variáveis foram testadas no nível superior (densidade de corrente de 10,0 A.m⁻² e modo de exposição de 6 ligado / 6 desligado), sugerindo que, sob essa condição,

o licor misto apresentaria maior filtrabilidade e a remoção de fósforo seria maximizada. Entretanto, para melhor visualização dos resultados, é apresentada na Figura 2 a superfície de resposta em função da desejabilidade combinada (D).

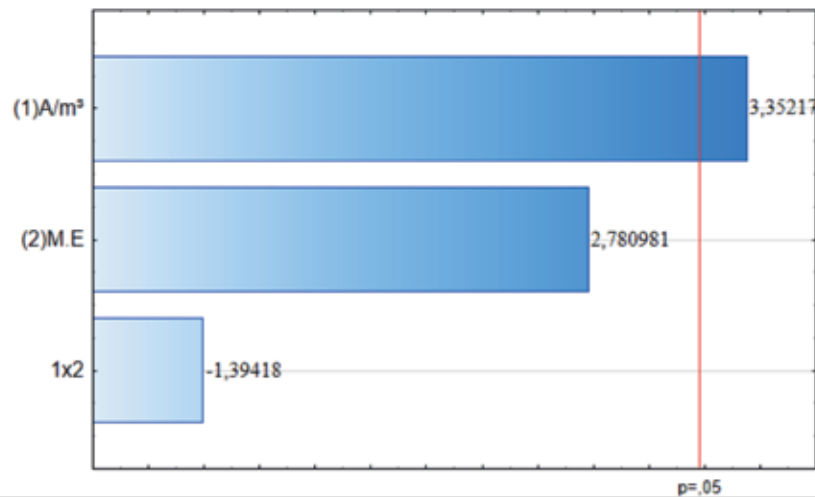
Figura 2 - Superfície de resposta em função da desajustabilidade combinada (D)



É possível constatar que as melhores condições operacionais são obtidas com os níveis superiores (+1) das duas variáveis, ou seja, com densidade de corrente de 10,0 A.m⁻² e modo de exposição de 6 min ligado / 6 min desligado. Contudo, cabe destacar que o ponto de máximo de rendimento não está contido na superfície de resposta obtida, o que indica que um aumento nos níveis das duas variáveis possivelmente aumentaria a eficiência global do processo. Porém tal condição não pode ser avaliada, uma vez que a densidade de corrente e o modo de exposição são limitados em função

do possível efeito adverso que a exposição à corrente pode exercer à biomassa.

Ao realizar um planejamento fatorial é importante identificar ainda a influência que o aumento de cada variável apresenta sobre a resposta, assim como determinar a interação entre elas. Para esse fim, é apresentada na Figura 3 a influência dos efeitos principais e de suas interações por meio do diagrama de Pareto, para um intervalo de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

Figura 3 - Diagrama de Pareto dos efeitos padronizados para a deseabilidade combinada

A.m⁻²: densidade de corrente; M.E: modo de exposição; 1x2: efeito combinado

Observa-se que, apesar de a superfície de resposta indicar melhores rendimentos com as duas variáveis no nível superior (Tabela 4), o único efeito significativo no processo é o da densidade de corrente aplicada. Ou seja, o efeito do modo de exposição e a interação entre as variáveis possuem pouca influência na capacidade de remoção de fósforo e no aumento da filtrabilidade do licor misto.

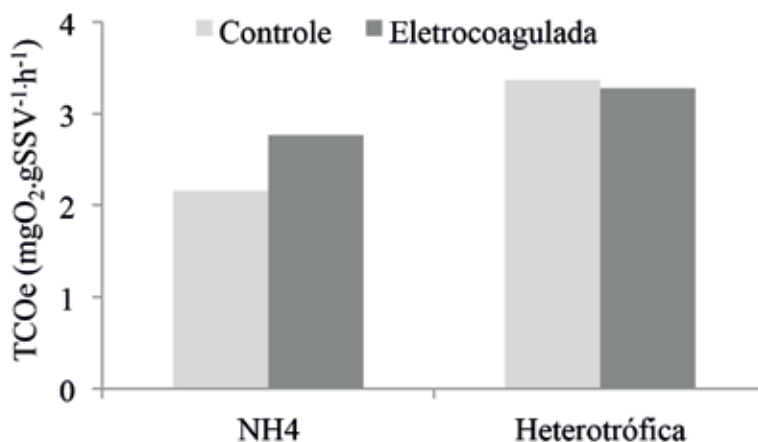
Em função disso, buscando-se um modo de operação eficiente aliado à economia de energia, optou-se por determinar a condição operacional com a densidade de corrente no nível superior (10,0 A.m⁻²) e o modo de exposição no nível inferior (6 min ligado / 18 min desligado) como a ideal. A condição escolhida é bastante interessante do ponto de vista de redução do consumo energético, uma vez que diversos estudos anteriormente

realizados empregaram densidades de corrente superiores a 10,0 A.m⁻² e modos de exposição com menor tempo desligado (HASAN et al., 2012; IBEID, ELEKTOROWICZ e OLESZKIEWICZ, 2013b; HUA et al., 2015; TAGHIPOUR et al., 2016). Cabe destacar ainda que, sob tal condição, em função do maior tempo de intervalo sem aplicação de corrente elétrica, os possíveis efeitos negativos a atividade da biomassa, caso houver, serão menos expressivos (ZEYOUDI et al., 2015).

3.3 Efeitos da aplicação da corrente elétrica na biomassa

Na Figura 4 é apresentada a TCO_{NH_4} e $TCO_{Heterotrófica}$ antes e após a aplicação da corrente elétrica, sob as condições operacionais identificadas como ótimas na etapa anterior.

Figura 4 - TCO_{NH4} e TCO_{Heterotrófica} da biomassa antes (controle) e após (eletrocoagulada) a aplicação da corrente elétrica



Verifica-se que não ocorreu variação expressiva na TCO_{Heterotrófica} após o processo de eletrocoagulação. Já com relação à TCO_{NH₄} foi observado um ligeiro aumento da atividade após a aplicação da corrente elétrica. Apesar de o aumento verificado ter sido pouco expressivo, acredita-se que tal comportamento pode estar relacionado ao fenômeno de eletroestimulação, o qual ocorre devido à melhoria na capacidade de transporte de elétrons nas células dos micro-organismos quando estes são submetidos à aplicação de uma corrente elétrica de baixa tensão (THRASH e COATS, 2008; ZEYOUNI et al., 2015). Dessa forma, acredita-se que a aplicação da corrente elétrica de 10,0 A.m⁻² sob modo de exposição intermitente de 6 min ligado / 18 min desligado pode ser realizada em BRM a fim de melhorar a filtrabilidade do licor misto e aumentar a remoção de fósforo do sistema, sem causar efeitos adversos à atividade da biomassa.

Wei et al. (2011), em estudo sobre a influência da aplicação de correntes elétricas na biomassa de um BRM, também observaram comportamento semelhante. Segundo esses autores, a atividade da biomassa é pouco afetada com a aplicação de densidades de corrente de até 12,3 A.m⁻². Liu et al. (2012), em estudo comparativo entre um BRM

convencional e um BRM com aplicação de um gradiente de tensão variando entre 0,2 e 0,4 V, também verificaram elevada melhora na filtrabilidade no licor misto submetido ao processo de eletrocoagulação, e não observaram efeitos negativos à atividade da biomassa.

4 CONCLUSÃO

A filtrabilidade do licor misto foi substancialmente melhorada após a aplicação da corrente elétrica em todos os ensaios. A remoção de P-PO₄⁻³ e PMS também foi satisfatória na maioria das condições testadas. Entretanto, nos ensaios com a aplicação da menor densidade de corrente ocorreu um aumento na concentração de PMS. A partir do planejamento fatorial e dos estudos estatísticos realizados, a condição operacional com densidade de corrente de 10 A.m⁻² e modo de exposição de 6 min ligada / 18 min desligada foi considerada a ideal para aplicação do processo, de modo a garantir elevada eficiência e reduzir o consumo de energia. Cabe destacar que, sob tal condição, a atividade heterotrófica da biomassa não foi expressivamente afetada e a atividade autotrófica foi levemente maximizada após a aplicação da corrente elétrica, como de-

monstram os ensaios de respirometria. Levando-se em consideração esses aspectos, conclui-se que o processo de tratamento proposto pode maximizar a remoção de fósforo e aumentar consideravelmente a filtrabilidade do licor misto, apresentando, portanto, elevada potencialidade de aplicação a fim de melhorar a eficiência e a estabilidade de BRM aplicados ao tratamento de efluentes sanitários.

5 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAMATSU, K.; LU, W.; SUGAWARA, T.; NAKAO, S. I. Development of a novel fouling suppression system in membrane bioreactors using an intermittent electric field. **Water research**, v. 44, n. 3, p. 825-830, 2010.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed., Washington, 2005.
- BOREA, L.; NADDEO, V.; BELGIORNO, V. Application of electrochemical processes to membrane bioreactors for improving nutrient removal and fouling control. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 321-333, 2016.
- DERRINGER, G.; SUICH R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, p. 214-219, 1980.
- DOHARE, E. D.; TRIVEDI, E. R. A Review on Membrane Bioreactors: An Emerging Technology for Industrial Wastewater Treatment. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, n. 12, p. 226-236, 2014.
- DREWS, A. Membrane fouling in membrane bioreactors—characterisation, contradictions, cause and cures. **Journal of Membrane Science**, v. 363, n. 1, p. 1-28, 2010.
- DUBOIS, M., GILLES, K. A., HAMILTON, J. K., REBERS, P. A., SMITH, P. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.
- HASAN, S.W.; ELEKTOROWICZ, M.; OLESZKIEWICZ, J. A. Correlations between trans-membrane pressure (TMP) and sludge properties in submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) and conventional membrane bioreactor (MBR). **Bioresource technology**, v. 120, p. 199-205, 2012.
- HUA, L. C.; HUANG, C.; SU, Y. C.; CHEN, P. C. Effects of electro-coagulation on fouling mitigation and sludge characteristics in a coagulation-assisted membrane bioreactor. **Journal of Membrane Science**, v. 495, p. 29-36, 2015.
- IBEID, S.; ELEKTOROWICZ, M.; OLESZKIEWICZ, J. A. Modification of activated sludge properties caused by application of continuous and intermittent current. **Water research**, v. 47, n. 2, p. 903-910, 2013a.
- IBEID, S.; ELEKTOROWICZ, M.; OLESZKIEWICZ, J. A. Novel electrokinetic approach reduces membrane fouling. **Water research**, v. 47, n. 16, p. 6358-6366, 2013b.
- IVERSEN, V.; KOSEGLU, H.; YIGIT, N. O.; DREWS, A.; KITIS, M.; LESJEAN, B.; KRAUME, M. Impacts of membrane flux enhancers on activated sludge respiration and nutrient removal in MBRs. **Water research**, v. 43, n. 3, p. 822-830, 2009.
- JARUSUTTHIRAK, C.; AMY, G. Role of soluble microbial products (SMP) in membrane fouling and flux decline. **Environmental science & technology**, v. 40, n. 3, p. 969-974, 2006.
- JI, J.; QIU, J.; WAI, N.; WONG, F. S.; LI, Y. Influence of organic and inorganic flocculants on physical-chemical properties of biomass and membrane-fouling rate. **Water research**, v. 44, n. 5, p. 1627-1635, 2010.
- JUDD, S.; JUDD, C. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment**. 2^a ed – Elsevier Ltd, Oxford, UK (2011).
- KIM, H. G.; JANG, H. N.; KIM, H. M.; LEE, D. S.; CHUNG, T. H. Effect of an electro phosphorous removal process on phosphorous removal and membrane permeability in a pilot-scale MBR. **Desalination**, v. 250, n. 2, p. 629-633, 2010.
- KOOTENAEI, G. F.; AMINIRAD, H. Membrane biological reactors (MBR) and their applications for water reuse. **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research**, v. 2, n. 7, p. 2208-2216, 2014.
- LACASA, E.; CAÑIZARES, P.; SAEZ, C.; FERNÁNDEZ, F. J.; RODRIGO, M. A. Electrochemical phosphates removal using iron and aluminium electrodes. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, n. 1, p. 137-143, 2011.
- LIN, H.; ZHANG, M.; WANG, F.; MENG, F.; LIAO, B. Q.; HONG, H.; GAO, W. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies. **Journal of Membrane Science**, v. 460, p. 110-125, 2014.
- LIU, L.; LIU, J.; BO, G.; YANG, F. Minute electric field reduced membrane fouling and improved performance of membrane bioreac-

tor. **Separation and Purification Technology**, v. 86, p. 106-112, 2012.

LOWRY, O. H., ROSEBROUGH, N. J., FARR, A. L. AND RANDALL, R. J. Protein Measurement With The Folin Phenol Reagent. **The Journal Of Biological Chemistry**. V. 193, n. 1, p. 265- 275, 1951.

MANNINA, G.; COSENZA, A. The fouling phenomenon in membrane bioreactors: assessment of different strategies for energy saving. **Journal of Membrane Science**, v. 444, p. 332-344, 2013.

METCALF and EDDY. **Wastewater Engineering - Treatment and reuse**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill (2003).

MISHIMA, I.; NAKAJIMA, J. Control of membrane fouling in membrane bioreactor process by coagulant addition. **Water Science & Technology**, v. 59, n. 7, p. 1255-1262, 2009.

MOLLAH, M. Y.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 114, n. 1, p. 199-210, 2004.

MORENO-CASILLAS, H. A.; COCKE, D. L.; GOMES, J. A.; MORKOVSKY, P.; PARGA, J. R.; PETERSON, E. Electrocoagulation mechanism for COD removal. **Separation and purification Technology**, v. 56, n. 2, p. 204-211, 2007.

SAHU, O.; MAZUMDAR, B.; CHAUDHARI, P. K. Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 4, p. 2397-2413, 2014.

SCHIPPERS, J. C.; VERDOUW, J. The modified fouling index, a method of determining the fouling characteristics of water. **Desalination**, v. 32, p. 137-148, 1980.

SHALABY, A.; NASSEF, E.; MUBARK, A.; HUSSEIN, M. Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. **American Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 5, n.1, p. 90-98, 2014.

TAFTI, A. D.; MIRZAI, S. M. S.; ANDALIBI, M. R.; VOSSOUGH, M. Optimized coupling of an intermittent DC electric field with a membrane bioreactor for enhanced effluent quality and hindered membrane fouling. **Separation and Purification Technology**, v. 152, p. 7-13, 2015.

TAGHIPOUR, N.; MOSAFERI, M.; SHAKERKHATIBI, M.; JAAFARZADEH, N.; DEGHANZADEH, R.; HOSSEINIA, H. Optimized coupling of a submerged membrane electro-bioreactor with pre-anaerobic reactors containing anode electrodes for wastewater treatment and fouling reduction. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 7, 2016.

THRASH J.C, COATES J.D. Review: direct and indirect electrical stimulation of microbial metabolism. **Environmental science & technology**, v. 42, p. 3921-3931, 2008.

WANG, H.; ZHANG, L., LI, Y.; HU, C. Influence of Filtration Aids on Continuous Filtration in Membrane Bioreactors. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 17, p. 7202-7208, 2014.

WANG, Z.; MEI, X.; WU, Z.; YE, S.; YANG, D. Effects of biopolymer discharge from MBR mixture on sludge characteristics and membrane fouling. **Chemical Engineering Journal**, v. 193, p. 77-87, 2012.

WEI, V.; ELEKTOROWICZ, M.; OLESZKIEWICZ, J. A. Influence of electric current on bacterial viability in wastewater treatment. **Water research**, v. 45, n. 16, p. 5058-5062, 2011.

ZEYUODI, M.; ALTENAIJI, E.; OZER, L. Y.; AHMED, I.; YOUSEF, A. F; AND HASAN, S. W. Impact of continuous and intermittent supply of electric field on the function and microbial community of wastewater treatment electro-bioreactors. **Electrochimica Acta**, v. 181, p. 271-279, 2015.

ZHANG, J.; SATTI, A.; CHEN, X.; XIAO, K.; SUN, J.; YAN, X.; HUANG, X. Low-voltage electric field applied into MBR for fouling suppression: Performance and mechanisms. **Chemical Engineering Journal**, v. 273, p. 223-230, 2015.